АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII 1971 Вып. 3

УДК 534:621,373

МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЗЕРКАЛА

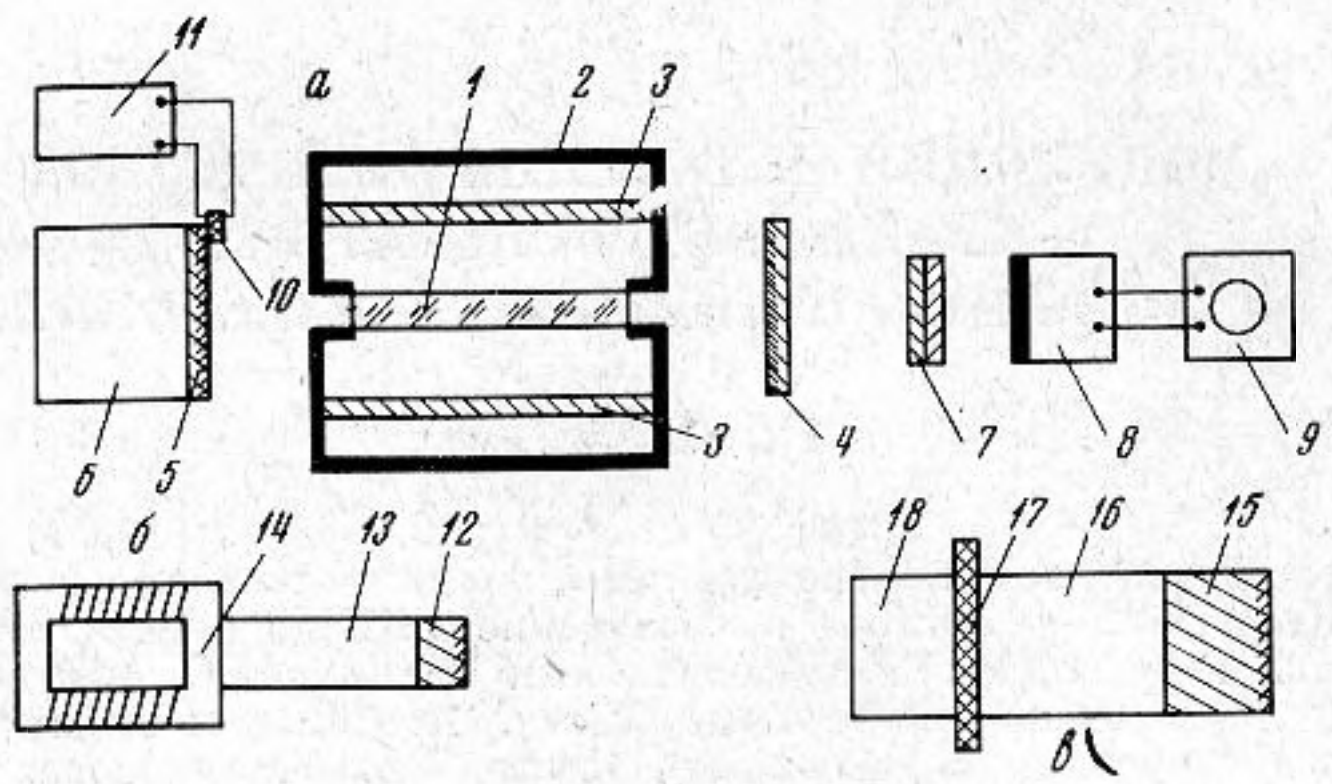
Г. Н. Белова

Рассмотрено воздействие ультразвуковых колебаний одного из зеркал оптического резонатора на излучение ОКГ на рубине. Исследуется кинетика излучения ОКГ в зависимости от амплитуды колебаний зеркала в диапазоне частот от 17 до 70 *кгц*. При опытах наблюдалась модуляция излучения с удвоенной частотой колебаний зеркала. Обнаружено, что индуцированное излучение происходит в моменты максимального смещения зеркала. В результате статистической обработки получена количественная оценка воздействия ультразвуковых колебаний зеркала на излучение ОКГ. Обсуждается механизм модуляции.

Исследованию кинетики излучения ОКГ на рубине при возбуждении в кристалле продольных ультразвуковых колебаний посвящены работы [1—3]. Эксперименты, описанные в этих работах, показали, что в присутствии упругих колебаний рубина излучение представляет собой регулярную последовательность интенсивных пичков или групп пичков, появляющихся один [1, 2] или два раза [3] за ультразвуковой период. Авторы работ [1, 2] высказали предположение, что модуляция возникает вследствие периодического изменения имеющихся в рубине внутренних напряжений и связанных с ними потерь световой энергии из-за рассеяния. Мы предположили, что механизм модуляции связан с периодическим изменением параметров оптического резонатора. В этом случае колебания одного из зеркал резонатора должны приводить к такому же эффекту, как и колебания кристалла относительно неподвижных зеркал. Однако против выдвинутого предположения говорили результаты экспериментов, о которых сообщается в работе [4]. В этих экспериментах при ультразвуковых колебаниях зеркала излучение происходило в виде экспоненциально затухающих регулярных пульсаций, частота следования которых определялась уровнем накачки, а не частотой колебаний зеркала. Настоящая работа посвящена исследованию влияния колебаний одного из зеркал резонатора на процесс излучения ОКГ.

Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1, *а*. Стандартный кристалл рубина *1* длиной 120 и диаметром 12 *мм* был расположен в фокусе двуэллиптического отражателя *2*. Накачка осуществлялась двумя импульсными лампами *3*. Система охлаждалась циркулирующим потоком воды. Оптический резонатор был образован внешними диэлектрическими зеркалами *4* и *5* с коэффициентами отражения 55% и 96% соответственно. Зеркало *5* совершало колебания с ультразвуковой частотой относительно кристалла *1* и зеркала *4*. Колебания зеркала создавались с помощью ультразвукового преобразователя *6*. Излучение ОКГ после ослабления светофильтрами 7 регистрировалось с помощью фотоумножителя *8* (ФЭУ-27) и осциллографа *9* (ИО-4).

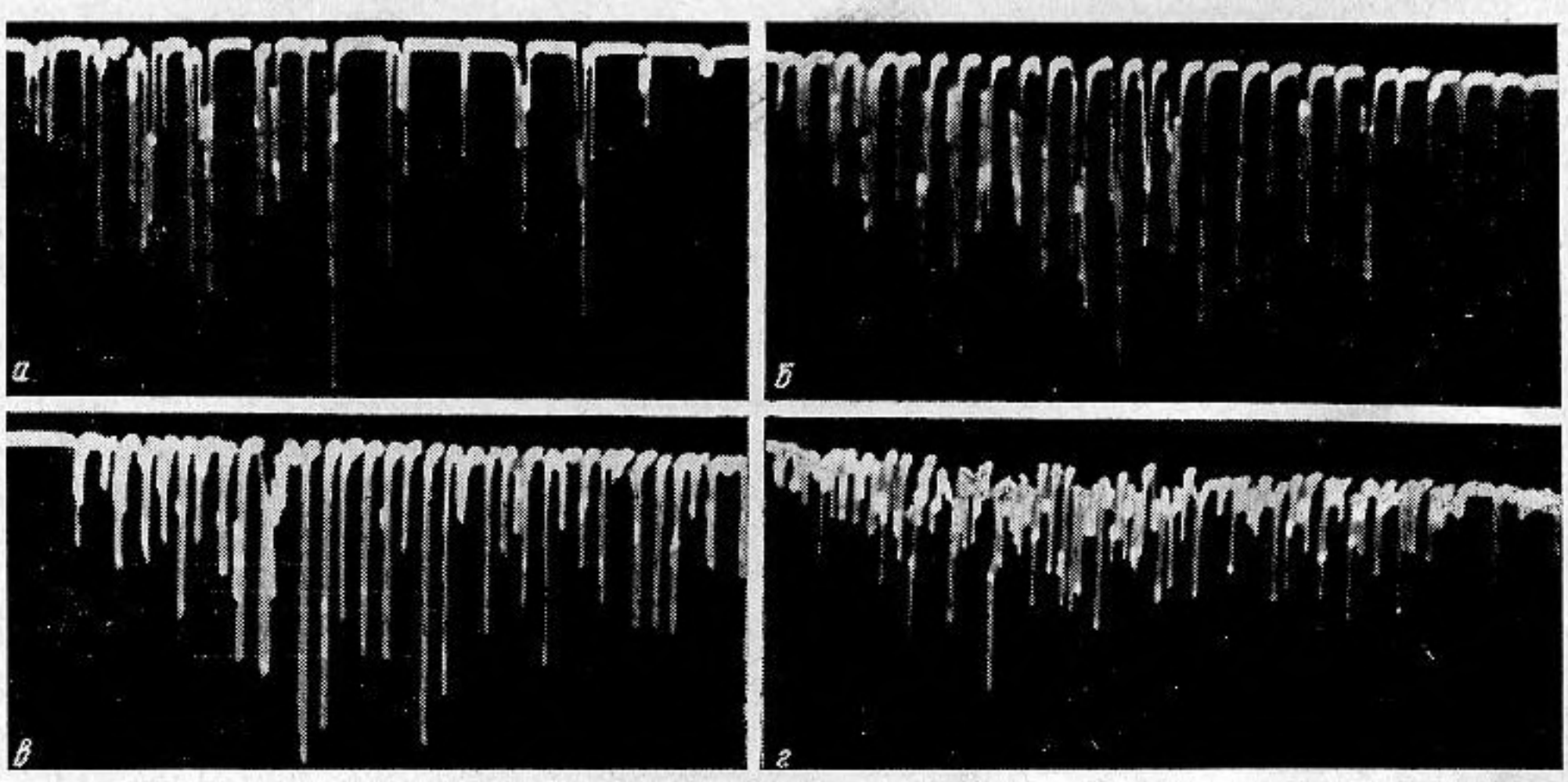
При опытах исследовалось влияние колебаний зеркала на кинетику генерации при трех частотах: 17,6 *кгц*, 39 *кгц* и 68 *кгц*. Фиг. 1, *б* поясняет способ возбуждения колебаний зеркала с частотой 17,6 *кгц*. Зеркало было напылено на одну из торцевых поверхностей плоскопараллельной стеклянной пластины *12*, которая была приклеена к стальному стержню *13* такого же диаметра и длиной 125 *мм*. Резонансные колебания в составном стержне возбуждались с помощью магнитострикционного вибратора *14*, причем максимальная амплитуда колебаний зеркала составляла 2 *мк*.



Фиг. 1.

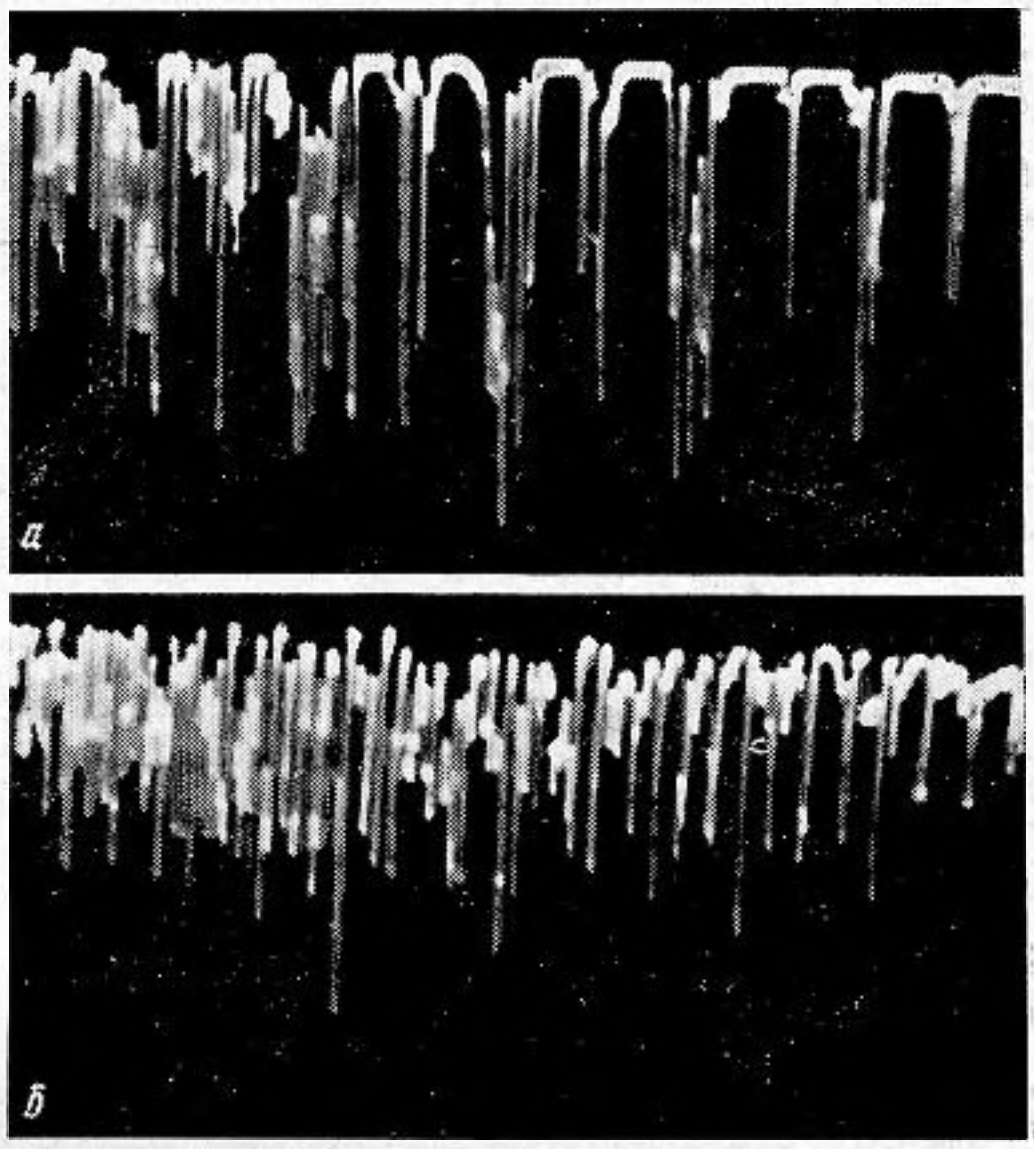
Для возбуждения колебаний зеркала с частотой 39 и 68 *кгц* стеклянная пластина *15* была использована как часть ультразвукового пакетного преобразователя, схематический чертеж которого представлен на фиг. 1, *в*. Пьезоэлектрическая пластина *17* изготовлялась из керамики ЦТС, а накладки *16* и *18* — из дюралюминия. Максимальная амплитуда колебаний зеркала на частоте 39 *кгц* достигала 0,3 *мк*, а на частоте 68 *кгц* — около 0,1 *мк*. Для контроля амплитуды и фазы колебаний зеркала на краю стеклянной пластины был приклеен пьезодатчик *10* (см. фиг. 1, *а*), электрический сигнал с которого регистрировался с помощью лампового милливольтметра *11* (МВЛ-3).

Эксперименты показали, что при ультразвуковых колебаниях зеркала происходит модуляция излучения ОКГ. Осциллограммы излучения, характеризующие влияние колебаний зеркала резонатора на кинетику ге-

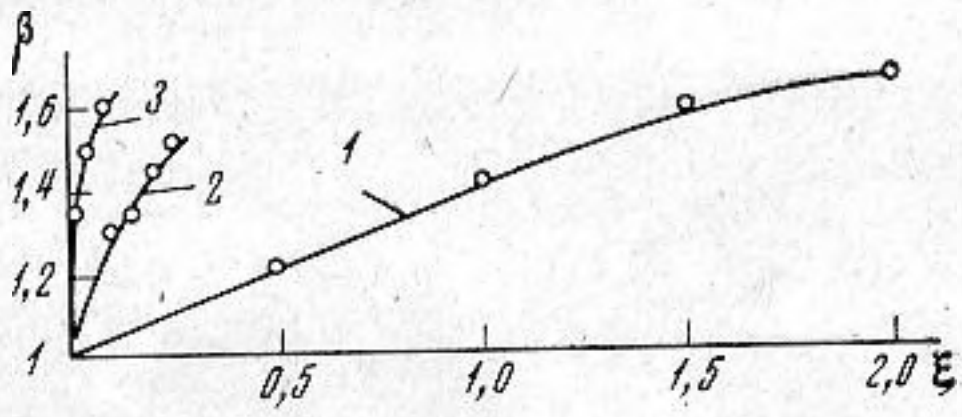


Фиг. 2

нерации, представлены на фиг. 2. Осциллограмма на фиг. 2, *а* получена, когда зеркало колебалось с частотой 17,6 *кгц* и амплитудой 2 *мк*; на фиг. 2, *б* — с частотой 39 *кгц* и амплитудой 0,25 *мк*, и на фиг. 2, *в* — с частотой 68 *кгц* и амплитудой около 0,1 *мк*. Для сравнения на фиг. 2, *г* приведена осциллограмма излучения при неподвижных зеркалах. Энергия накачки везде постоянна и превышала пороговую величину на 20%. В результате сопоставления и временнóго анализа осциллограмм установлено, что характер модуляции не зависит от частоты колебаний зеркала. Так же, как и в случае колеблющегося рубина, импульс излучения представляет собой регулярную последовательность, образованную группами пичков, причем группы следуют с удвоенной частотой колебаний зеркала. Длительность групп зависит от амплитуды колебаний и мощности накачки. С уменьшением амплитуды временная ширина групп растет. Увеличение накачки отражается на четкости синхронизации аналогично уменьшению амплитуды колебаний. На фиг. 3, *а* приведена осциллограмма излучения при энергии накачки, превышающей пороговую на 44%, и амплитуде колебаний зеркала около 2 *мк*; на фиг. 3, *б* — осциллограмма излучения в режиме свободной генерации. Из осциллограмм видно, что в начале генерации ширина групп близка к длительности полупериода ультразвуковых колебаний, поэтому модуляция оказывается нечеткой. Управление излучением ОКГ оказывается возможным только к концу генерации.



Фиг. 3

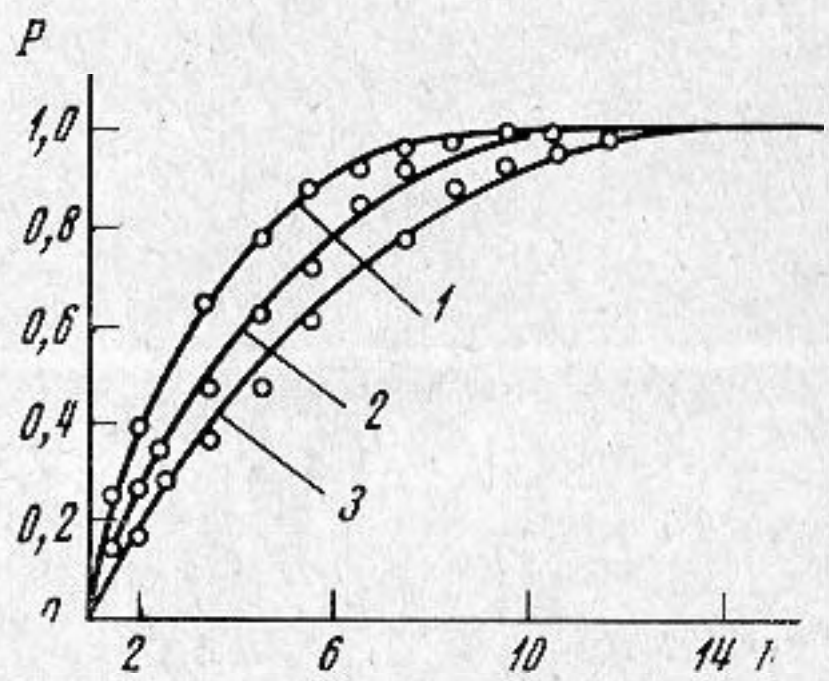


Фиг. 4

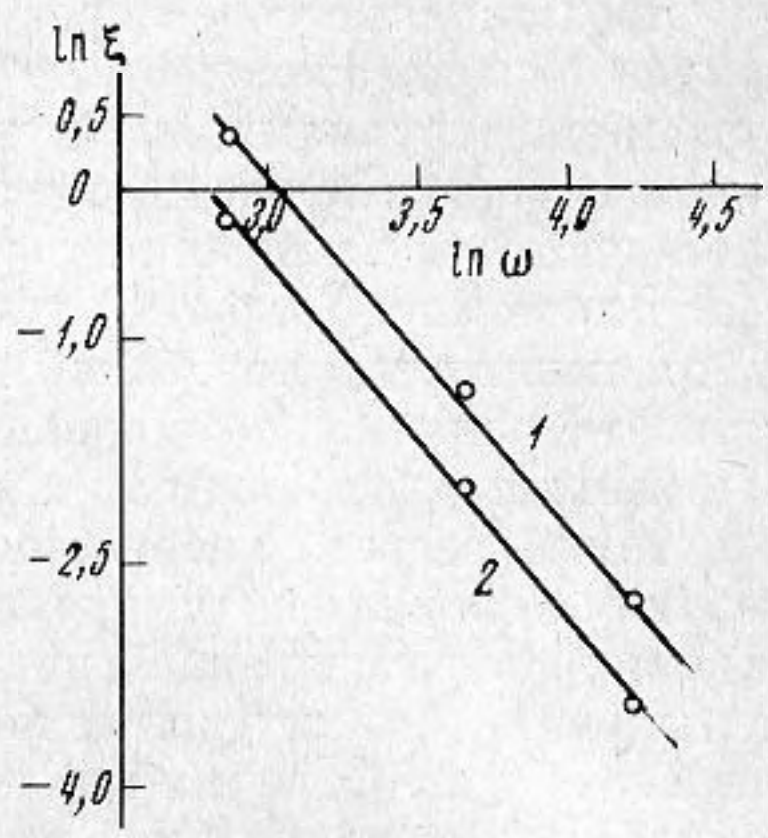
Для количественной оценки влияния колебаний отражающего зеркала на излучение ОКГ была проведена статистическая обработка осциллограмм по методу, описанному в работе [3]. В результате статистической обработки обнаружено, что при неизменной интегральной энергии излучения с увеличением амплитуды колебаний зеркала происходит увеличение средней пиковой интенсивности. На фиг. 4 показана зависимость относительной пиковой интенсивности β от амплитуды колебаний ξ для частот 17,6, 39 и 68 *кгц* (кривые *1*, *2*, *3* соответственно). Величина β представляет собой отношение средней интенсивности пичков в модулированном импульсе к средней интенсивности пичков в импульсе при свободной генерации. Как видно из фиг. 4, при определенной амплитуде колебаний зеркала средняя интенсивность пичков может возрасти в 1,5 — 2 раза.

Полученные в результате статистической обработки осциллограмм интегральные функции распределения пичков в импульсе по интенсивности позволяют проследить процесс перераспределения энергии излучения между пичками для различных амплитуд колебаний зеркала. Так как характер перераспределения энергии не зависит от частоты колебаний зеркала, рас-

смотрим его на примере функций распределения для излучения, наблюдаемого при колебаниях зеркала с частотой 39 *кгц*. На фиг. 5 приведены интегральные функции распределения: кривая *1* — для немодулированного импульса, *2* и *3* — для импульсов генерации в присутствии ультразвуковых колебаний зеркала с амплитудой 0,15 и 0,25 *мк* соответственно. По оси абсцисс отложена величина интенсивности пичков h в условиях единицах, а по оси ординат — вероятность P появления в импульсе излучения пичков определенной интенсивности. Как видно из фиг. 5, излучение при колеблющемся зеркале состоит из пичков более высокой интенсивности, чем в случае излучения в режиме свободной генерации. Так,

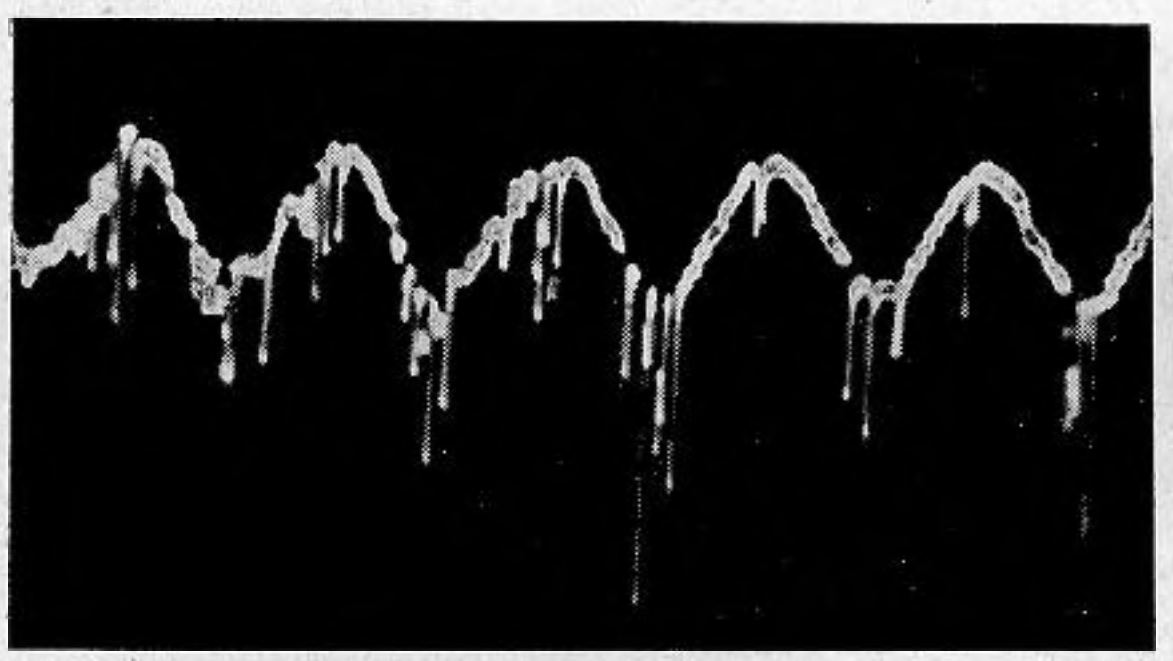


Фиг. 5



Фиг. 6

например, при амплитуде колебаний зеркала 0,25 *мк* вероятность появления пичков с интенсивностью $h \leqslant 5$ сокращается примерно в 1,5 раза, и одновременно вероятность появления пичков с интенсивностью $h > 5$ увеличивается в 2,5 раза по сравнению со случаем неподвижных зеркал. Кроме того, максимально достигаемая пиковая интенсивность излучения увеличивается в 1,3 раза.



Фиг. 7

Сопоставление результатов, полученных при колебаниях зеркала с тремя различными частотами, показало, что количественные характеристики процесса модуляции зависят от частоты. Если в качестве параметра, характеризующего эффективность воздействия колебания зеркала на излучение, выбрать величину относительной интенсивности β, то связь между амплитудой ξ и частотой колебаний ω при $\beta = \text{const}$ будет отражена зависимостями, представленными на фиг. 6 в логарифмическом масштабе. Кривая *1* получена для $\beta = 1{,}5$; *2* — для $\beta = 1{,}3$. Аналитическое выражение описывается функцией $\xi = A(\beta)\,\omega^{-n}$, где $n = 2$ с точностью до 15%. Это соотношение говорит о том, что для получения определенной эффективности воздействия колебаний зеркала на излучение ОКГ требуемая величина амплитуды колебаний уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты.

Для понимания механизма процесса модуляции большое значение имеет определение фазы колебаний зеркала, при которой происходит генерация групп пичков. Для определения фазы на вертикальные пластины

фотоумножителя и с пьезодатчика. На фиг. 7 приведена одна из полученных таким образом осциллограмм. На осциллограмме периодический сигнал характеризует изменение во времени напряжения на пьезодатчике, которое пропорционально смещению зеркала. Экстремумы кривой соответствуют максимальным отклонениям зеркала; группы вертикальных выбросов (импульсов) характеризуют пичковую генерацию. Как видно из осциллограммы, индуцированное излучение происходит в моменты максимального смещения зеркала или близкие к ним. Следует отметить, что фаза колебаний зеркала, при которой происходит генерация, не зависит от амплитуды колебаний зеркала.

Сравнивая результаты экспериментов с колеблющимся зеркалом с результатами исследования свойств и характера процесса модуляции, наблюдаемой в аналогичных условиях при ультразвуковых колебаниях кристалла [3], можно утверждать, что модуляция излучения при колебаниях кристалла и зеркала имеет одинаковую физическую природу. Проведенные эксперименты показали, что процесс модуляции возникает вследствие изменения параметров оптического резонатора, а не кристалла, как предполагали авторы работ [1, 2]. Механизм модуляции можно себе представить следующим образом. Колебания кристалла или зеркала вызывают периодическую частотную перестройку оптического резонатора и изменение частоты распространяющейся в резонаторе электромагнитной волны вследствие эффекта Допплера. В результате, как показано в в работе [5], в резонаторе возникают так называемые «динамические моды», частота и амплитуда которых непрерывно трансформируются во времени. По-видимому, при колебаниях кристалла или зеркала динамические моды, являясь результатом неустойчивого состояния системы, погасают, не успевая вызвать индуцированные переходы у основной массы возбужденных активных центров. Поэтому под действием продолжающейся накачки инверсия растет, и в момент кратковременной остановки системы, когда скорость движения зеркала или кристалла равна нулю, происходит интенсивное излучение.

Следут указать, что подобные соображения о механизме модуляции излучения твердотельных оптических квантовых генераторов путем возбуждения колебаний отражающего зеркала или торцов кристалла впервые были высказаны Аскарьяном в работе [6].

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Возбуждение колебаний одного из зеркал резонатора с ультразвуковой частотой приводит к модуляции излучения ОКГ.

2. Частота модуляции соответствует удвоенной частоте ультразвуковых колебаний зеркала.

3. Возбуждение колебаний зеркала дает возможность увеличить интенсивность пичков в 1,5 — 2 раза.

4. Излучение в модулированном импульсе происходит в моменты, когда скорость движения зеркала равна или близка к нулю.

5. Характер модуляции не зависит от частоты колебаний зеркала.

6. Интенсивность излучения в модулированном импульсе при постоянной энергии накачки зависит от величины амплитуды и частоты колебаний зеркала.

В заключение автор выражает глубокую признательность В. Ф. Казанцеву за ценные советы и благодарит А. И. Симанкову за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Torada, S. Kainuma, N. Tsuya, H. Inaba. Periodically controlled oscillation of ruby laser by ultrasonic frequency application. J. Appl. Phys. Japan, 1963, 32, 7, 509—513.
2. E. Meyer, W. Eisenmenger, D. Güsewell. Akustische steuerung der Emis-

sion eines Rubinlasers durch Longitudinale Schwingungen des Rubinstabes. Acustica, 1965, **15**, 5, 249—255.
3. Г. Н. Белова, В. Ф. Казанцев. Ультразвуковая модуляция оптического квантового генератора. Акуст. ж., 1969, **15**, 1, 5—11.
4. E. A. Gerber, E. R. Ahlstrom. Ruby laser with piezoelectrically excited vibrating reflector. J. Appl. Phys., 1964, **35**, 8, 2546—2547.
5. Р. И. Баранов, Ю. М. Широков. Электромагнитное поле в оптическом резонаторе с подвижным зеркалом. Ж. эксп. и теор. физ., 1967, **53**, 6 (12), 2123—2130.
6. Г. А. Аскарьян. Взаимодействие излучения лазеров с колеблющимися поверхностями. Ж. эксп. и теор. физ., 1962, **42**, 6, 1672—1673.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
8 апреля 1970 г.